

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Matija Hranilović

Zagreb, 2016.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Dr. sc. Damir Dović, dipl. ing.

Student:

Matija Hranilović

Zagreb, 2016.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se svom mentoru, prof. dr. sc. Damiru Doviću na stručnoj pomoći i strpljenju tijekom izrade završnog rada. Također se zahvaljujem kolegama Alanu Rodiću, mag.ing., Ivanu Horvatu, mag.ing. te laborantu gдинu Željku Badžeku na pruženoj pomoći te korisnim savjetima tijekom mjerenja u Laboratoriju za toplinu i toplinske uređaje Fakulteta strojarstva i brodogradnje.

Posebno se zahvaljujem svojoj obitelji na podršci tijekom studija.

Matija Hranilović



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:
procesno-energetski, konstrukcijski, brodstrojarski i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum 9 -09- 2016	Prilog
Klasa: 602-04/16-6/3	
Ur.broj: 15-1703-16-349	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Matija Hranilović**

Mat. br.: 0035190949

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Određivanje toplinskih karakteristika podnog konvektora**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Determination of convector thermal characteristics**

Opis zadatka:

U sklopu ovog završnog rada potrebno je provesti proračun podnog konvektora u režimu grijanja koji se nalazi na ispitivanju u Laboratoriju za toplinu i toplinske uređaje. Proračun je potrebno provesti za uvjete rada određene normom HRN EN 442-2. Rezultate proračuna potrebno je usporediti s onima dobivenim mjerenjima na predmetnom konvektoru. Pri tome je potrebno provesti mjerenja brzina i temperatura u istrujnom mlazu zraka iz konvektora pomoću anemometra sa žarnom niti i termoparova te dodatno pomoću termografske kamere, sve kako bi se dobili ulazni podaci za proračun toplinskog učinka prema odabranoj metodi za orebene površine.

Slijedom toga potrebno je napraviti parametarsku analizu najutjecajnijih geometrijskih parametara te dati smjernice za poboljšanje konstrukcije s ciljem povećanja toplinskog učinka.

U radu navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:
25. studenog 2015.

Rok predaje rada:
1. rok: 25. veljače 2016
2. rok (izvanredni): 20. lipnja 2016.
3. rok: 17. rujna 2016.

Predviđeni datumi obrane:
1. rok: 29.2., 02. i 03.03. 2016.
2. rok (izvanredni): 30. 06. 2016.
3. rok: 19., 20. i 21. 09. 2016.

Zadatak zadao:

Prof. dr. sc. Damir Dović

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Igor Balen

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA.....	IV
POPIS OZNAKA	V
SAŽETAK.....	VIII
1. UVOD	1
1.1. Konvektori - općenito	1
1.2. Vrste konvektora.....	3
2. MJERENJE	4
2.1. Mjerna linija	4
2.2. Mjerna oprema.....	6
2.3. Inicijalno mjerenje	9
2.4. Procedura mjerenja prema HRN EN 442-2	10
2.5. Postupak mjerenja.....	11
3. OBRADA I ANALIZA REZULTATA MJERENJA	13
3.1. Rezultati mjerenja.....	13
3.1.1. $\Delta T = 50 \pm 2,5 \text{ K}$	13
3.1.2. $\Delta T = 60 \pm 2,5 \text{ K}$	15
3.1.3. $\Delta T = 30 \pm 2,5 \text{ K}$	16
3.2. Usporedba rezultata toplinskog učina na strani vode i zraka	17
3.3. Određivanje karakteristične jednadžbe toplinskog učina	18
3.4. Termografija	19
4. PRORAČUN TOPLINSKOG UČINA OREBRENE POVRŠINE	21
4.1. Konstrukcijske mjere:	21
4.2. Prijelaz topline na strani vode	22
4.3. Prijelaz topline na strani zraka.....	24
4.4. Koeficijent prolaza topline	26
4.5. Toplinski učin	26
4.6. Usporedba eksperimentalnih i numeričkih rezultata	27
5. PARAMETARSKA ANALIZA	29
5.1. Debljina i razmak između lamela	29

5.2. Visina i širina lamele	32
5.3. Materijal lamele	33
5.4. Protok vode	34
5.5. Zaključak parametarske analize	35
6. ZAKLJUČAK	39
LITERATURA	40

POPIS SLIKA

Slika 1. Princip rada zidnog konvektora	1
Slika 2. Ugradnja zidnih konvektora	2
Slika 3. Ugradnja podnih konvektora	2
Slika 4. Princip rada ventilokonvektora	3
Slika 5. Pojednostavljena shema mjerne linije	4
Slika 6. Konvektor u ispitnoj prostoriji	5
Slika 7. Mjerna linija	5
Slika 8. Termoparovi tipa T	6
Slika 9. Razmještaj mjernih točaka za precizno mjerenje referentne temperature prostorije prema HRN EN 442-2	6
Slika 10. Analogno-digitalni pretvarač	7
Slika 11. Termografska kamera	7
Slika 12. Anemometar sa žarnom niti	8
Slika 13. Pretvarač brzine strujanja	8
Slika 14. Postupak mjerenja	12
Slika 15. Usporedba toplinske karakteristike na strani vode i zraka	17
Slika 16. Karakteristična jednadžba toplinskog učina	19
Slika 17. Termogram bočnog zida iznad konvektora	19
Slika 18. Termogram zida iznad konvektora	20
Slika 19. Termogram zida iznad konvektora	20
Slika 20. Skica lamele	21
Slika 21. Lamela podijeljena na dva dijela	22
Slika 22. Usporedba eksperimentalnih i numeričkih rezultata	28
Slika 23. Utjecaj debljine lamela na toplinski učin	29
Slika 24. Utjecaj razmaka između lamela na toplinski učin	30
Slika 25. Utjecaj smanjena razmaka između lamela te dimenzije c na toplinski učin	31
Slika 26. Utjecaj visine lamele na toplinski učin	32
Slika 27. Utjecaj širine lamele na toplinski učin	33
Slika 28. Utjecaj materijala lamele na toplinski učin	34
Slika 29. Utjecaj protoka vode na toplinski učin	35
Slika 30. Utjecaj razmaka između lamela na toplinski učin $\Phi/A/Lk$	37
Slika 31. Utjecaj visine lamele na toplinski učin $\Phi/A/Lk$	37
Slika 32. Utjecaj širine lamele na toplinski učin $\Phi/A/Lk$	38

POPIS TABLICA

Tablica 1. Rezultati mjerenja za $\Delta T = 50 \pm 2,5$ K	13
Tablica 2. Rezultati mjerenja za $\Delta T = 60 \pm 2,5$ K	15
Tablica 3. Rezultati mjerenja za $\Delta T = 30 \pm 2,5$ K	16
Tablica 4. Usporedba rezultata toplinskog učina na strani vode i zraka	17
Tablica 5. Pomoćna tablica za izračun K_m i n	18
Tablica 6. Rezultati prema proračunu orebrenja	27
Tablica 7. Usporedba eksperimentalnih i numeričkih rezultata	27
Tablica 8. Omjeri rezultata dobivenih eksperimentalno i numerički	27
Tablica 9. Utjecaj debljine lamela na toplinski učin	29
Tablica 10. Utjecaj razmaka između lamela na toplinski učin.....	30
Tablica 11. Utjecaj smanjena razmaka između lamela te dimenzije c na toplinski učin	31
Tablica 12. Utjecaj visine lamele na toplinski učin	32
Tablica 13. Utjecaj širine lamele na toplinski učin	32
Tablica 14. Utjecaj materijala lamele na toplinski učin	33
Tablica 15. Utjecaj protoka vode na toplinski učin.....	34
Tablica 16. Vrijednosti karakterističnih veličina uz smanjenje razmaka između lamela	36
Tablica 17. Vrijednosti karakterističnih veličina uz povećanje visine lamele	36
Tablica 18. Vrijednosti karakterističnih veličina uz povećanje širine lamele.....	36

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
L	m	udaljenost od prve lamele
Φ	W	toplinski učin
$q_{m,w}$	kg/s	maseni protok vode
$h_{w,1}$	J/kg	ulazna specifična entalpija vode
$h_{w,2}$	J/kg	izlazna specifična entalpija vode
K_m	-	konstanta modela
$\Delta T, \Delta \vartheta$	K, °C	nadtemperatura
n	-	eksponent karakteristične jednadžbe
ϑ_m	°C	srednja temperatura vode
ϑ_r	°C	referentna temperatura
$\vartheta_{w,1}$	°C	temperatura polaza vode
$\vartheta_{w,2}$	°C	temperatura povrata vode
N	-	broj mjernih točaka
c_w	J/kgK	specifični toplinski kapacitet vode
A_p	m ²	nastrujna površina
L_k	m	duljina konvektora
b_k	m	širina konvektora
ρ_z	kg/m ³	gustoća zraka
$q_{m,z}$	kg/s	maseni protok zraka
w_z	m/s	brzina strujanja zraka
$c_{p,z}$	J/kgK	specifični toplinski kapacitet zraka
$h_{z,1}$	J/kg	ulazna specifična entalpija zraka
$h_{z,2}$	J/kg	izlazna specifična entalpija zraka
$\vartheta_{z,1}$	°C	ulazna temperatura zraka
$\vartheta_{z,2}$	°C	izlazna temperatura zraka
d_o	m	vanjski promjer cijevi

δ_t	m	debljina stijenke cijevi
d_i	m	unutarnji promjer cijevi
λ_t	W/mK	toplinska vodljivost materijala cijevi
δ	m	debljina lamele
a	m	razmak između lamela
s	m	korak lamele
l_f	m	širina lamele
b_f	m	visina lamele
c_f	m	treća dimenzija lamele
λ_f	W/mK	toplinska vodljivost materijala lamele
w_w	m/s	brzina strujanja vode
ρ_w	kg/m ³	gustoća vode
μ_w	Pas	dinamička viskoznost vode
λ_w	W/mK	toplinska vodljivost vode
Re	-	Reynoldsov broj
Pr	-	Prandtlov broj
Nu	-	Nusseltov broj
γ	-	faktor turbulencije
$Nu_{m,q,2300}$	-	Nusseltov broj za $Re=2300$
$Nu_{m,q,2,2300}$	-	pomoćna vrijednost za izračun $Nu_{m,q,2300}$
$Nu_{m,q,3,2300}$	-	pomoćna vrijednost za izračun $Nu_{m,q,2300}$
$Nu_{m,10^4}$	-	Nusseltov broj za $Re=10^4$
μ_z	Pas	dinamička viskoznost zraka
λ_z	W/mK	toplinska vodljivost zraka
α_i	W/m ² K	koeficijent prijelaza topline na strani vode
A_i	m ²	unutarnja površina cijevi
A_f	m ²	površina lamela
A_t	m ²	vanjska površina cijevi između rebara
$A_{t,0}$	m ²	vanjska površina neorebrene cijevi
A	m ²	ukupna površina izmjene topline

C	-	konstanta za raspored cijevi
α_m	W/m ² K	koeficijent prijelaza topline na strani zraka
α_v	W/m ² K	koeficijent prijelaza topline na orebrenoj cijevi
η_f	-	iskoristivost lamele
φ'	-	pomoćni faktor za izračun η_f
φ	-	pomoćni faktor za izračun η_f
X	-	pomoćni faktor za izračun η_f
k	W/m ² K	koeficijent prolaza topline
$\Delta\vartheta_m$	°C	srednja logaritamska razlika temperatura

SAŽETAK

U ovom radu opisano je određivanje i analiza toplinskih karakteristika podnog konvektora u režimu grijanja u uvjetima rada prema normi HRN EN 442-2. Mjerenje je provedeno u Laboratoriju za toplinu i toplinske uređaje Fakulteta strojarstva i brodogradnje za tri različita temperaturna režima uvjetovana normom.

Uvodno je dan opis, glavne karakteristike te osnovna podjela konvektora. Nadalje je opisan postupak ispitivanja iz norme HRN EN 442-2. Dan je opis mjerne linije te samog mjerenja mjernom opremom – anemometrima sa žarnom niti, termoparovima i termografskom kamerom. Rezultati mjerenja su podvrgnuti analizi te su kao ulazni podaci korišteni za proračun prijelaza topline, tj. rashladnog učina prema metodi iz VDI Heat Atlasa.

Na kraju je dana usporedba rezultata dobivenih eksperimentalno te numerički, nakon čega slijedi parametarska analiza s preporukom poboljšanja konstrukcije konvektora s ciljem povećanja rashladnog učina.

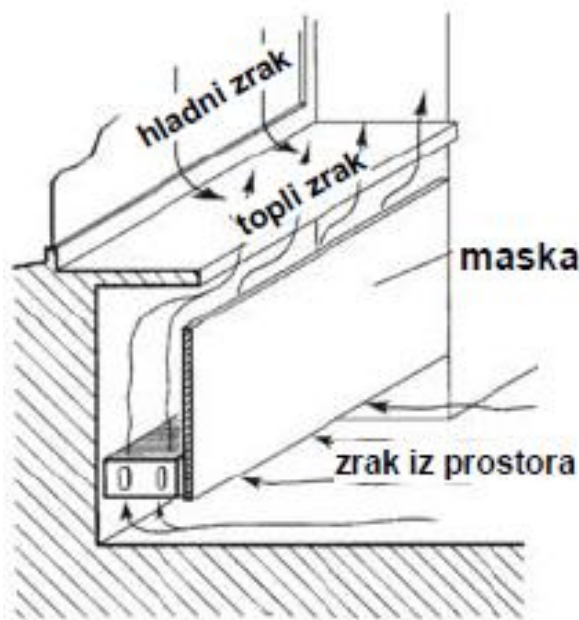
Ključne riječi: podni konvektor, toplinski učin, parametarska analiza

1. UVOD

1.1. Konvektori - općenito

Konvektori su ogrjevna tijela kojima je osnovni mehanizam izmjene topline konvekcija (samo manjim dijelom zračenje). Sastavljeni su od cijevi kružnog ili ovalnog presjeka s nanizanim lamelama/rebrima. Lamelle su ugrađene kako bi se povećala površina izmjene topline na strani zraka. Lamelle se mogu prešati (Al lamelle na Cu cijevi) ili zavarivati na cijevi (čelični lim na čeličnu cijev).

Princip rada konvektora temelji se na razlikama gustoća između toplog i hladnog zraka. Teži hladni zrak iz prostorije ulazi s donje strane u konvektor, zagrije se na ogrijevnim površinama – lamelama te izađe zagrijan na gornjoj strani. Za zidni konvektor, princip je prikazan na slici 1.



Slika 1. Princip rada zidnog konvektora

Konvektore je najbolje smjestiti uz vanjski zid, ispod prozora. Tako se kompenzira propuh i gubici zračenjem i konvekcijom prema hladnom prozoru, te se poboljšava efekt indukcije hladnog i toplog zraka.

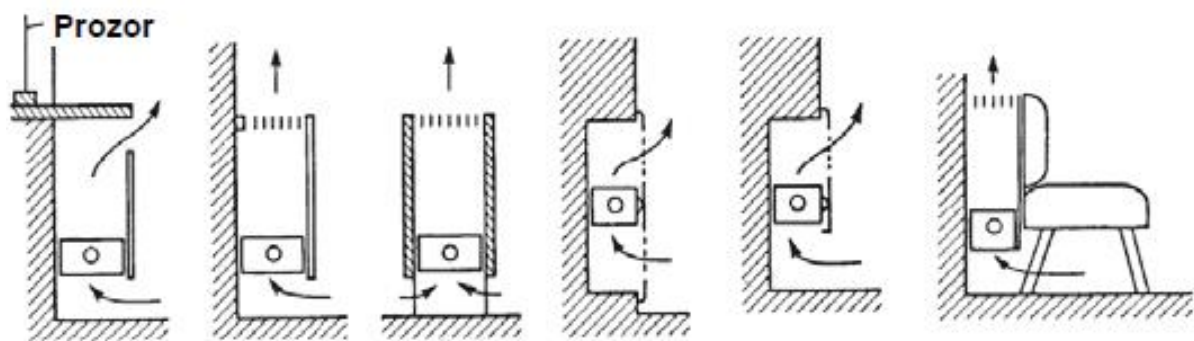
Prednosti konvektora u odnosu na druga ogrjevna tijela su sljedeće:

- male dimenzije, mala masa (dobro iskorištenje raspoloživog prostora)
- relativno mali sadržaj vode – utječe pozitivno na vrijeme zagrijavanja čime se izravno utječe na inertnost sustava – moguća relativno brza regulacija

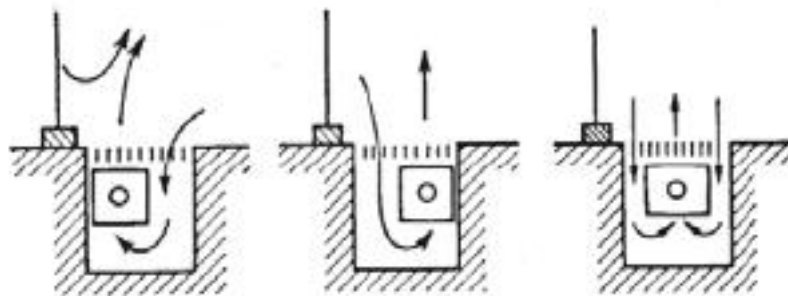
S druge strane, nedostaci konvektora su slijedeći:

- izgled ogrjevnog tijela – koristi se maska ili rešetka, nije pogodan za stambene namjene (s eventualnom iznimkom konvektora smještenog u podnom kanalu)
- otežano čišćenje – zbog gustih lamela potrebno je izbjegavati prostore gdje se zahtjeva visoka razina čistoće ili gdje je moguće pojačano onečišćenje
- mali toplinski kapacitet

Neki od mogućih načina montaže konvektora prikazani su na slijedećim slikama:



Slika 2. Ugradnja zidnih konvektora

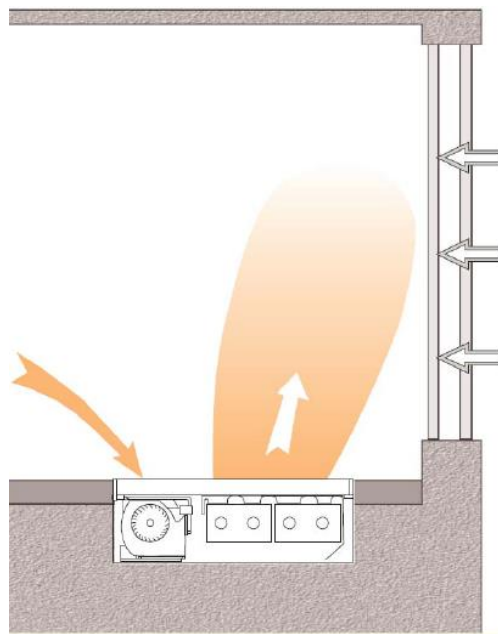


Slika 3. Ugradnja podnih konvektora

1.2. Vrste konvektora

Konvektore možemo podijeliti prema načinu izmjene topline na:

- Konvektore s prirodnom cirkulacijom zraka (slobodna konvekcija) – strujanje zraka uvjetovano utjecajem uzgona koji nastaje kao posljedica razlike gustoća hladnog i toplog zraka
- Konvektore s prisilnom cirkulacijom zraka - ventilokonvektore (prisilna konvekcija) – s ugrađenim ventilatorom što za posljedicu ima bolji koeficijent prijelaza topline a s time i veći rashladni učin



Slika 4. Princip rada ventilokonvektora

Također, konvektore možemo podijeliti prema načinu ugradnje na:

- Stropne konvektore
- Podne konvektore
- Zidne konvektore

U nastavku rada bavit ćemo se konvektorom iz Laboratorija za toplinu i toplinske uređaje, koji spada u kategoriju podnih konvektora s prirodnom cirkulacijom zraka.

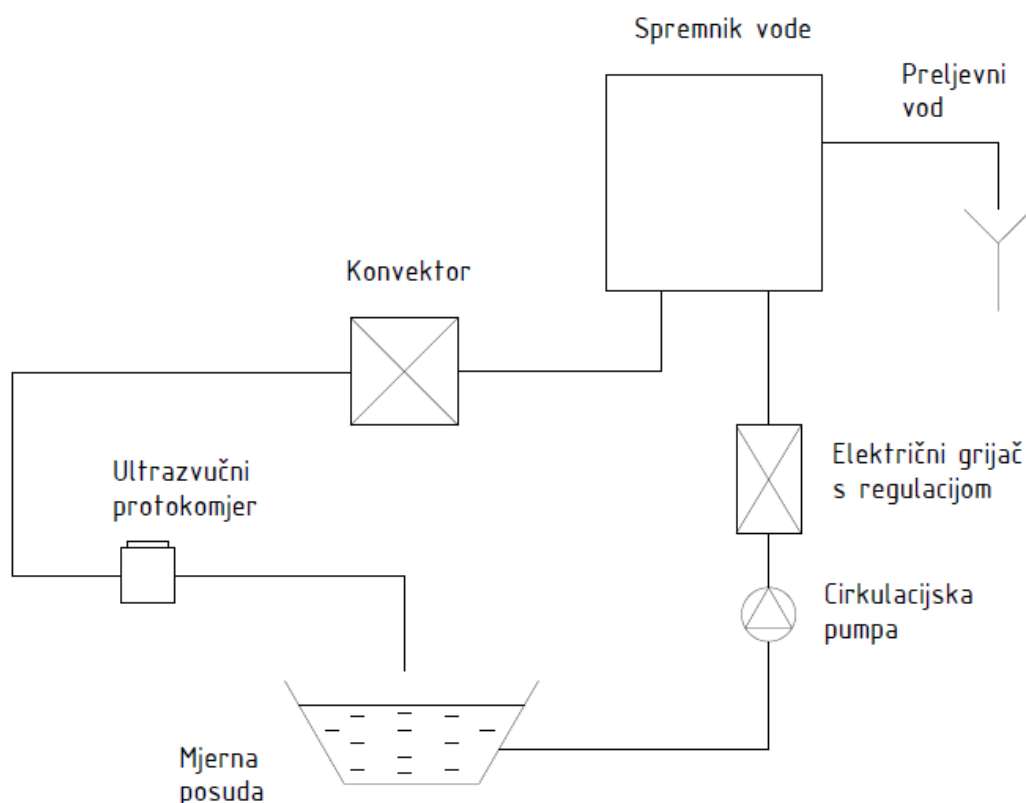
2. MJERENJE

Mjerenje na konvektoru provedeno je u Laboratoriju za toplinu i toplinske uređaje na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu u srpnju 2016. god. Mjerenje je izvedeno prema normi HRN EN 442-2.

2.1. Mjerna linija

Konvektor je instaliran u ispitnoj prostoriji prema normi HRN EN 442-2.

Pojednostavljena shema mjerne linije dana je na slici.



Slika 5. Pojednostavljena shema mjerne linije

Protočna voda cirkulacijskom pumpom tjera se kroz sustav. Grije se na postavljenu temperaturu električnim grijačem te se nakon prolaska kroz konvektor vraća u mjernu posudu. Sustav je otvoren što nam omogućuje mjerenje masenog protoka pomoću vage i štoperice, međutim takvo mjerenje koristimo samo kao provjeru rada ultrazvučnog protokomjera koji mjeri volumni protok vode i spojen je na računalu kako bi mogli bilježiti numeričke iznose protoka vode kroz konvektor.

Na slijedećim fotografijama prikazana je mjerna linija unutar i izvan ispitne prostorije.



Slika 6. Konvektor u ispitnoj prostoriji



Slika 7. Mjerna linija

2.2. Mjerna oprema

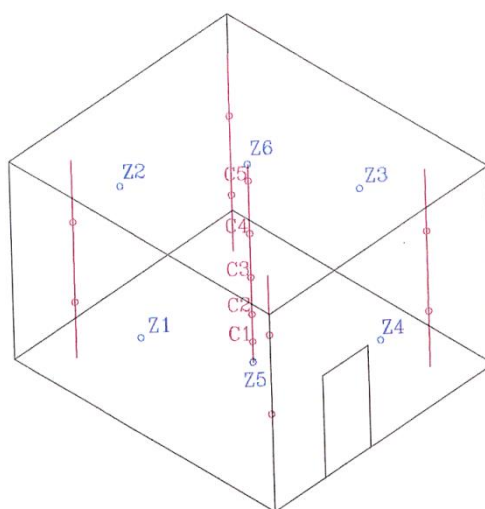
Temperatura je mjerena termoparovima tipa T, bakar- konstantan (Slika 8). Prema normi HRN EN 442-2, mjerimo temperaturu prostorije na 9 različitih pozicija u prostoriji na zadanim visinama te u težištima ploha prostorije (Slika 9). Također, mjerimo temperaturu polaza i povrata vode, te temperature zraka ispod i iznad ogrjevnice površine (na ulazu i izlazu iz konvektora) na određenim mjernim točkama.

Termoparovi su preko A/D pretvarača (Slika 10) spojeni na računalo gdje pomoću softwera pod nazivom „Benchlink data logger“ pratimo temperature tijekom vremena.

Temperaturni profil dodatno je snimljen i termografskom kamerom (Slika 11).



Slika 8. Termoparovi tipa T



Slika 9. Razmještaj mjernih točaka za precizno mjerenje referentne temperature prostorije prema HRN EN 442-2



Slika 10. Analogno-digitalni pretvarač

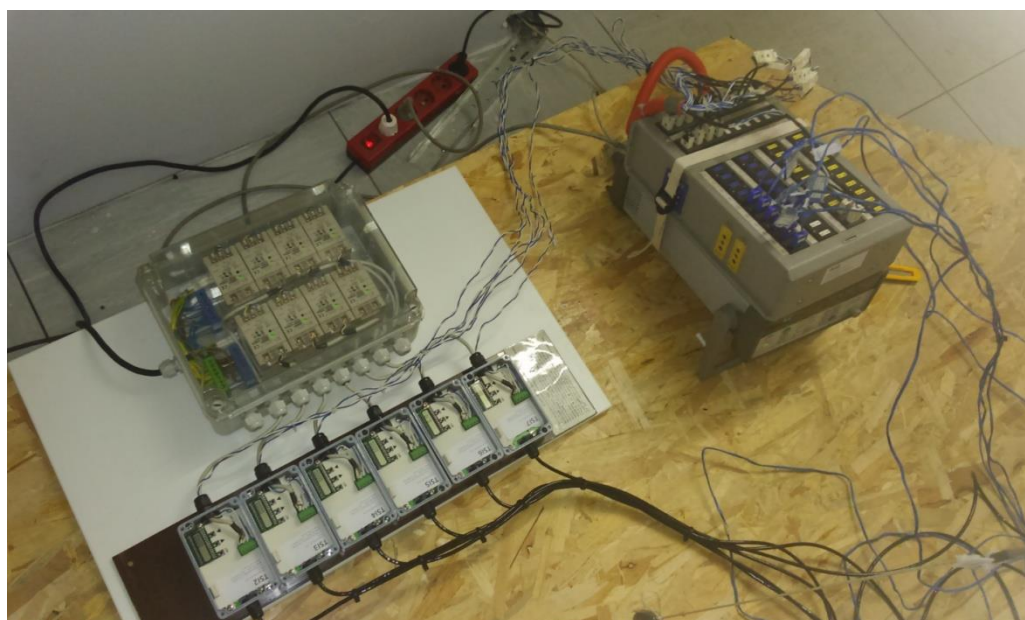


Slika 11. Termografska kamera

Brzina strujanja zraka mjerena je anemometrima sa žarnom niti (Slika 12) u okomitom smjeru tik iznad orebrene površine konvektora. Anemometri su preko pretvarača brzine strujanja (Slika 13) te A/D pretvarača također spojeni na računalo gdje pratimo brzine strujanja.



Slika 12. Anemometar sa žarnom niti



Slika 13. Pretvarač brzine strujanja

2.3. Inicijalno mjerenje

Inicijalno mjerenje provedeno je u svrhu određivanja varijacija iznosa temperatura i brzina strujanja zraka duž konvektora. Termoparovi i anemometri razmješteni su po duljini konvektora. Odabrali smo i mjerne pozicije točno iznad nosača zaštitne maske konvektora. Također smo probali mjeriti temperature i brzine na različitim udaljenostima od vrha orebrene površine konvektora.

Nakon provedenog mjerenja došli smo do nekoliko bitnih zaključaka:

- 1) Mjerenje je očekivano pokazalo da je temperatura iznad nosača zaštitne maske znatno manja nego na ostalim pozicijama. Nosač zaustavlja protok zraka na svom uskom području te tako sprječava zagrijavanje zraka. Zaključujemo da mjerne pozicije ne smiju biti određene u uskom području oko nosača. Također temperatura se ne mijenja znatnije po duljini konvektora.
- 2) Pomak termopara po visini na određenoj duljini konvektora pokazuje vrlo velike promjene izmjerene temperature (čak i preko 10 °C). Zaključujemo da je utjecaj indukcije zraka vrlo velik, te da ćemo morati mjeriti temperature vrlo blizu vrha orebrene površine.

Također, uočavamo razlike u temperaturi (puno neznatnije) poprečnim pomakom termopara na određenoj duljini te zaključujemo da termopar treba nastojati postaviti u samu sredinu između zaštitne maske i zida kako bi maksimalno umanjili utjecaj zračenja.

- 3) Mjerenje brzine strujanja zraka pokazalo je kako su anemometri vrlo osjetljivi na pomak po visini na određenoj duljini konvektora. Prijelaz topline na strani zraka odvija se slobodnom konvekcijom pa su brzine strujanja zraka vrlo male te se znatno smanjuju odmakom od vrha orebrene površine. Zaključujemo da ćemo i brzine strujanja zraka morati mjeriti što je moguće bliže vrhu orebrene površine.

Provedenim inicijalnim mjerenjem došli smo do zaključaka kako i gdje postaviti pozicije mjerenja kod temperaturnih režima propisanih normom HRN EN 442-2. U skladu sa time, odlučili smo se za šest mjernih pozicija duž konvektora redom na udaljenostima od prve lamele:

- 1) $L = 50$ cm
- 2) $L = 110$ cm
- 3) $L = 170$ cm
- 4) $L = 240$ cm
- 5) $L = 310$ cm
- 6) $L = 410$ cm (bočni zid)

2.4. Procedura mjerenja prema HRN EN 442-2

Prema HRN EN 442-2 toplinski učin može biti određen na dva načina:

- Metodom vaganja – mjerenjem protoka vode kroz ogrjevno tijelo te utvrđivanjem razlike entalpije polaza i povrata
- Električnom metodom – mjerenjem energije predane krugu vode

Za potrebe ovog rada koristimo metodu vaganja.

Dakle toplinski učin računamo preko razlika entalpija polaza i povrata vode:

$$\Phi = q_{m,w}(h_{w,1} - h_{w,2})$$

Karakteristična jednadžba glasi:

$$\Phi = K_m \cdot \Delta T^n$$

gdje je

Φ - toplinski učin

K_m - konstanta modela

ΔT – nadtemperatura

n – eksponent karakteristične jednadžbe

Nadtemperatura se određuje prema izrazu kao razlika između srednje temperature vode i referentne temperature prostorije:

$$\Delta\vartheta = \vartheta_m - \vartheta_r$$

gdje je srednja temperatura vode određena izrazom:

$$\vartheta_m = \frac{\vartheta_{w,1} + \vartheta_{w,2}}{2}$$

dok se referentna temperatura za potrebe ovog rada dobiva osrednjavanjem temperatura izmjerenih u prethodno spomenutih 9 točaka ispitne prostorije.

Konstanta modela te eksponent karakteristične jednadžbe dobivaju se primjenom metode najmanjih kvadrata prema izrazima:

$$\log K_m = \frac{\sum(\log \Phi) \cdot \sum[(\log \Delta T)^2] - \sum(\log \Delta T \cdot \log \Phi) \cdot \sum(\log \Delta T)}{N \cdot \sum[(\log \Delta T)^2] - (\sum(\log \Delta T))^2}$$

$$n = \frac{N \cdot \sum(\log \Delta T \cdot \log \Phi) - \sum(\log \Delta T) \cdot \sum(\log \Phi)}{N \cdot \sum[(\log \Delta T)^2] - (\sum(\log \Delta T))^2}$$

gdje je

N - broj mjernih točaka

Jednadžba se određuje na temelju barem tri mjerne točke, pri konstantnom protoku vode te slijedećim iznosima nadtemperatura:

$$\Delta T = (30 \pm 2,5) \text{ K}$$

$$\Delta T = (50 \pm 2,5) \text{ K}$$

$$\Delta T = (60 \pm 2,5) \text{ K}$$

Prilikom određivanja karakteristične jednadžbe, referentna temperatura zraka mora se održavati u rasponu od ± 1 K između mjerenja. Protok vode smije imati dopuštenu varijaciju od $\pm 1\%$ tokom testa. On se dobiva pomoću standardne nadtemperature od 50 K i temperaturnog pada od 10 K između temperatura polaza i povrata, i treba se održavati konstantnim uz toleranciju od $\pm 5\%$ za sve mjerne točke.

2.5. Postupak mjerenja

Ispitna prostorija je posebnim sustavom hlađena zrakom kako bi se održavala relativno konstantna referentna temperatura prostorije.

Prvi korak u mjerenju je pokretanje cirkulacijske pumpe čime osiguravamo protok vode kroz konvektor. Nadalje podešavamo električni grijač sa regulacijom na određenu temperaturu kako bi dobili željenu temperaturu polaza vode. Nakon toga regulacijom protoka zapornim ventilima osiguravamo zadanu temperaturnu razliku polaza i povrata.

Kada se stanje u prostoriji stacionira, pristupamo samom mjerenju. Termoparove te anemometre sa žarnom niti postavljamo na mjerne pozicije koje smo utvrdili inicijalnim mjerenjem. Mjerenjem na više pozicija dobit ćemo realnu osrednjenu temperaturu zraka iznad i ispod orebrene površine te brzinu strujanja zraka duž konvektora. Također spajamo ultrazvučni protokomjer na A/D pretvarač kako bi na računalu mogli pratiti i iznose protoka vode. Dodatno mjerimo temperature polaza i povrata vode, te temperature u 9 točaka prostorije.

Također snimamo raspodjelu temperatura termografskom kamerom.

Postupak ponavljamo za tri različita temperaturna režima zadana normom HRN EN 442-2 (za nadtemperature 30, 50 i 60 °C)



Slika 14. Postupak mjerenja

3. OBRADA I ANALIZA REZULTATA MJERENJA

3.1. Rezultati mjerenja

Rezultati mjerenja prikazani su tablično za pojedini iznos ΔT .

3.1.1. $\Delta T = (50 \pm 2,5) \text{ K}$

	zrak			voda			prostor
L [cm]	$\vartheta_{z,2} [^{\circ}\text{C}]$	$\vartheta_{z,1} [^{\circ}\text{C}]$	$w_z [\text{m/s}]$	$\vartheta_{w,1} [^{\circ}\text{C}]$	$\vartheta_{w,2} [^{\circ}\text{C}]$	$q_{m,w} [\text{kg/s}]$	$\vartheta_r [^{\circ}\text{C}]$
50	41,33	22,65	0,180	74,55	63,80	0,0132	23,57
110	40,99	22,56	0,189	74,26	63,73	0,0131	23,44
170	40,80	22,49	0,172	74,22	63,74	0,0131	23,40
240	39,87	22,28	0,158	74,43	63,61	0,0130	23,29
310	40,43	22,20	0,181	74,23	63,65	0,0132	23,25
410	41,66	22,21	0,170	74,26	63,76	0,0131	23,23
osrednjena vrijednost	40,85	22,40	0,176	74,33	63,71	0,0131	23,36

Tablica 1. Rezultati mjerenja za $\Delta T = (50 \pm 2,5) \text{ K}$

Nadtemperatura iznosi:

$$\Delta\vartheta = \frac{\vartheta_{w,1} + \vartheta_{w,2}}{2} - \vartheta_r = 47,66 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Specifični toplinski kapacitet za srednju temperaturu vode prema [4] iznosi:

$$c_w = 4191 \text{ J/kgK}$$

Toplinski učin na strani vode dakle iznosi:

$$\Phi = q_{m,w}(h_{w,1} - h_{w,2}) = q_{m,w} \cdot c_w \cdot (\vartheta_{w,1} - \vartheta_{w,2})$$

$$\Phi = 581,22 \text{ W}$$

Još nam preostaje izračunati toplinski učin na strani zraka, iz izmjerenih vrijednosti brzine i temperatura zraka. Za to nam je potreban maseni protok zraka koji ćemo izračunati preko jednadžbe kontinuiteta za koju nam treba nastrujna površina:

$$A_p = L_k \cdot b_k$$

gdje su L_k i b_k izmjerene vrijednosti ukupne duljine konvektora, te njegove širine koje redom iznose:

$$L_k = 4,86 \text{ m}$$

$$b_k = 0,029 \text{ m}$$

Dakle površina iznosi:

$$A_p = L_k \cdot b_k = 0,14094 \text{ m}^2$$

što zajedno sa gustoćom za srednju temperaturu zraka prema [4] :

$$\rho_z = 1,166 \text{ kg/m}^3$$

daje maseni protok zraka prema izrazu:

$$q_{m,z} = A_p \cdot w_z \cdot \rho_z = 0,02887 \text{ kg/s}$$

Specifični toplinski kapacitet za srednju temperaturu zraka prema [4] iznosi:

$$c_{p,z} = 1005 \text{ J/kgK}$$

Prema tome toplinski učin na strani zraka iznosi:

$$\Phi = q_{m,z}(h_{z,2} - h_{z,1}) = q_{m,z} \cdot c_{p,z} \cdot (\vartheta_{z,2} - \vartheta_{z,1})$$

$$\Phi = 535,25 \text{ W}$$

3.1.2. $\Delta T = (60 \pm 2, 5) \text{ K}$

	zrak			voda			prostor
L [cm]	$\vartheta_{z,2} [^{\circ}\text{C}]$	$\vartheta_{z,1} [^{\circ}\text{C}]$	$w_z [\text{m/s}]$	$\vartheta_{w,1} [^{\circ}\text{C}]$	$\vartheta_{w,2} [^{\circ}\text{C}]$	$q_{m,w} [\text{kg/s}]$	$\vartheta_r [^{\circ}\text{C}]$
50	49,54	23,17	2,317	89,18	73,94	1,2052	23,92
110	50,01	23,28	2,328	89,67	74,30	1,2111	24,13
170	49,40	23,28	2,328	89,93	74,35	1,2119	24,15
240	49,43	23,21	2,321	90,05	74,25	1,2103	24,18
310	48,70	23,26	2,326	90,09	74,23	1,2100	24,18
410	48,67	23,23	2,323	90,12	74,15	1,2087	24,14
osrednjena vrijednost	49,41	23,24	0,191	89,84	74,20	0,0120	24,12

Tablica 2. Rezultati mjerenja za $\Delta T = (60 \pm 2, 5) \text{ K}$

Nadtemperatura iznosi:

$$\Delta\vartheta = \frac{\vartheta_{w,1} + \vartheta_{w,2}}{2} - \vartheta_r = 57,90 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Specifični toplinski kapacitet za srednju temperaturu vode prema [4] iznosi:

$$c_w = 4200 \text{ J/kgK}$$

Toplinski učin na strani vode dakle iznosi:

$$\Phi = q_{m,w}(h_{w,1} - h_{w,2}) = q_{m,w} \cdot c_w \cdot (\vartheta_{w,1} - \vartheta_{w,2})$$

$$\Phi = 790,78 \text{ W}$$

Analogno prethodnom postupku računamo toplinski učin na strani zraka.

Gustoća za srednju temperaturu zraka prema [4] iznosi:

$$\rho_z = 1,1426 \text{ kg/m}^3$$

daje maseni protok zraka prema izrazu:

$$q_{m,z} = A_p \cdot w_z \cdot \rho_z = 0,03072 \text{ kg/s}$$

Specifični toplinski kapacitet za srednju temperaturu zraka prema [4] iznosi

$$c_{p,z} = 1005 \text{ J/kgK}$$

Prema tome toplinski učin na strani zraka iznosi:

$$\Phi = q_{m,z}(h_{z,2} - h_{z,1}) = q_{m,z} \cdot c_{p,z} \cdot (\vartheta_{z,2} - \vartheta_{z,1})$$

$$\Phi = 808,18 \text{ W}$$

3.1.3. $\Delta T = (30 \pm 2,5) \text{ K}$

	zrak			voda			prostor
L [cm]	$\vartheta_{z,2} [^{\circ}\text{C}]$	$\vartheta_{z,1} [^{\circ}\text{C}]$	$w_z [\text{m/s}]$	$\vartheta_{w,1} [^{\circ}\text{C}]$	$\vartheta_{w,2} [^{\circ}\text{C}]$	$q_{m,w} [\text{kg/s}]$	$\vartheta_r [^{\circ}\text{C}]$
50	35,77	21,12	2,112	57,22	50,33	0,8203	22,03
110	36,06	21,07	2,107	57,40	50,53	0,8236	22,07
170	35,28	21,29	2,129	57,67	50,76	0,8274	22,12
240	34,50	21,19	2,119	58,10	50,85	0,8288	22,12
310	34,53	21,32	2,132	58,33	50,94	0,8303	22,21
410	34,46	21,40	2,140	58,42	51,20	0,8346	22,31
osrednjena vrijednost	35,10	21,23	0,160	57,86	50,77	0,0118	22,14

Tablica 3. Rezultati mjerenja za $\Delta T = (30 \pm 2,5) \text{ K}$

Nadtemperatura iznosi:

$$\Delta\vartheta = \frac{\vartheta_{w,1} + \vartheta_{w,2}}{2} - \vartheta_r = 32,17 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Specifični toplinski kapacitet za srednju temperaturu vode prema [4] iznosi:

$$c_w = 4183 \text{ J/kgK}$$

Toplinski učin na strani vode dakle iznosi:

$$\Phi = q_{m,w}(h_{w,1} - h_{w,2}) = q_{m,w} \cdot c_w \cdot (\vartheta_{w,1} - \vartheta_{w,2})$$

$$\Phi = 350,08 \text{ W}$$

Gustoća za srednju temperaturu zraka prema [4] iznosi:

$$\rho_z = 1,174 \text{ kg/m}^3$$

daje maseni protok zraka prema izrazu:

$$q_{m,z} = A_p \cdot w_z \cdot \rho_z = 0,02646 \text{ kg/s}$$

Specifični toplinski kapacitet za srednju temperaturu zraka iznosi []:

$$c_{p,z} = 1005 \text{ J/kgK}$$

Prema tome toplinski učin na strani zraka iznosi:

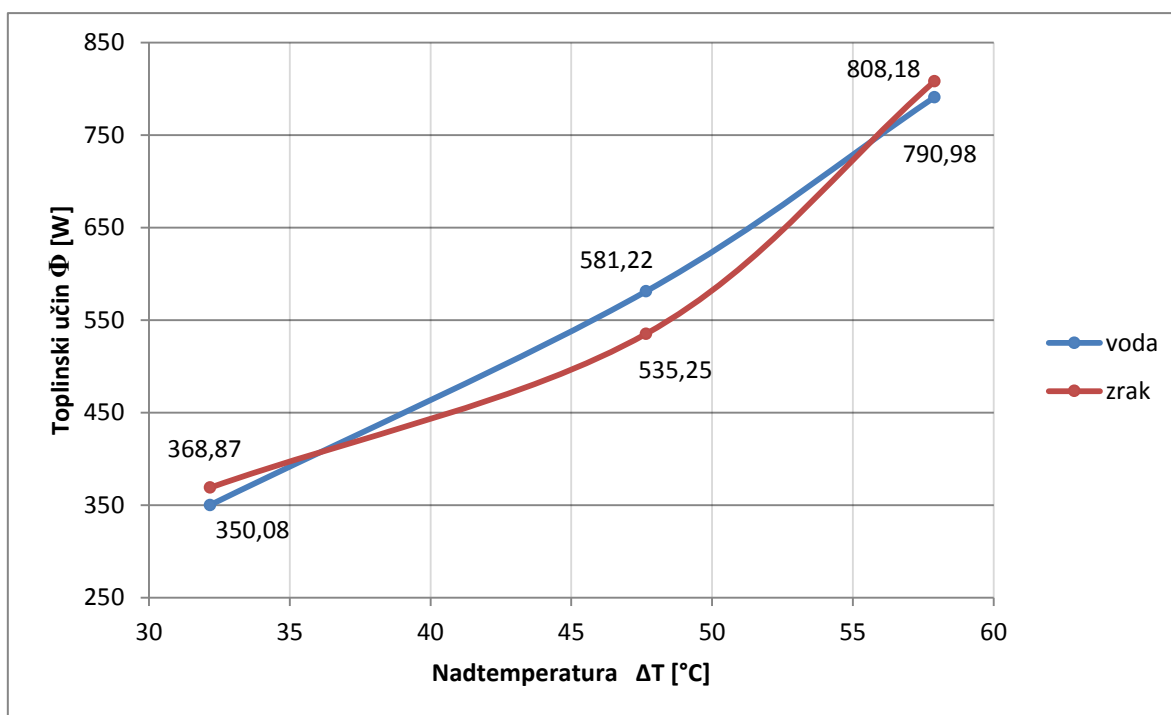
$$\Phi = q_{m,z}(h_{z,2} - h_{z,1}) = q_{m,z} \cdot c_{p,z} \cdot (\vartheta_{z,2} - \vartheta_{z,1})$$

$$\Phi = 368,87 \text{ W}$$

3.2. Usporedba rezultata toplinskog učina na strani vode i zraka

	Oznaka	Jedinica	1)	2)	3)
Nadtemperatura	$\Delta\vartheta$	°C	32,17	47,66	57,90
Toplinski učin (voda)	Φ	W	350,08	581,22	790,78
Toplinski učin (zrak)	Φ	W	368,87	535,25	808,18

Tablica 4. Usporedba rezultata toplinskog učina na strani vode i zraka



Slika 15. Usporedba toplinske karakteristike na strani vode i zraka

Iz dijagrama je vidljivo da su razlike toplinskog učina u 3 mjerne točke manje od 10%, što je pokazatelj prilično dobrih mjernih rezultata.

3.3. Određivanje karakteristične jednadžbe toplinskog učina

nadtemperatura	32,17	47,66	57,9
$\log \Delta T$	1,5075	1,6782	1,7627
Φ	350,08	581,22	790,78
$\log \Phi$	2,5442	2,7643	2,8981
$\sum (\log \Delta T)$	4,9483		
$\sum (\log \Phi)$	8,2066		
$\log \Delta T \cdot \log \Phi$	3,8352	4,6390	5,1083
$\sum (\log \Delta T \cdot \log \Phi)$	13,5825		
$(\log \Delta T)^2$	2,2724	2,8162	3,1070
$\sum [(\log \Delta T)^2]$	8,1956		
$(\sum (\log \Delta T))^2$	24,4855		

Tablica 5. Pomoćna tablica za izračun K_m i n

Uvrštavanjem u prethodno postavljene jednadžbe dobivamo:

$$\log K_m = \frac{\sum (\log \Phi) \cdot \sum [(\log \Delta T)^2] - \sum (\log \Delta T \cdot \log \Phi) \cdot \sum (\log \Delta T)}{N \cdot \sum [(\log \Delta T)^2] - (\sum (\log \Delta T))^2}$$

$$\log K_m = 0,4716$$

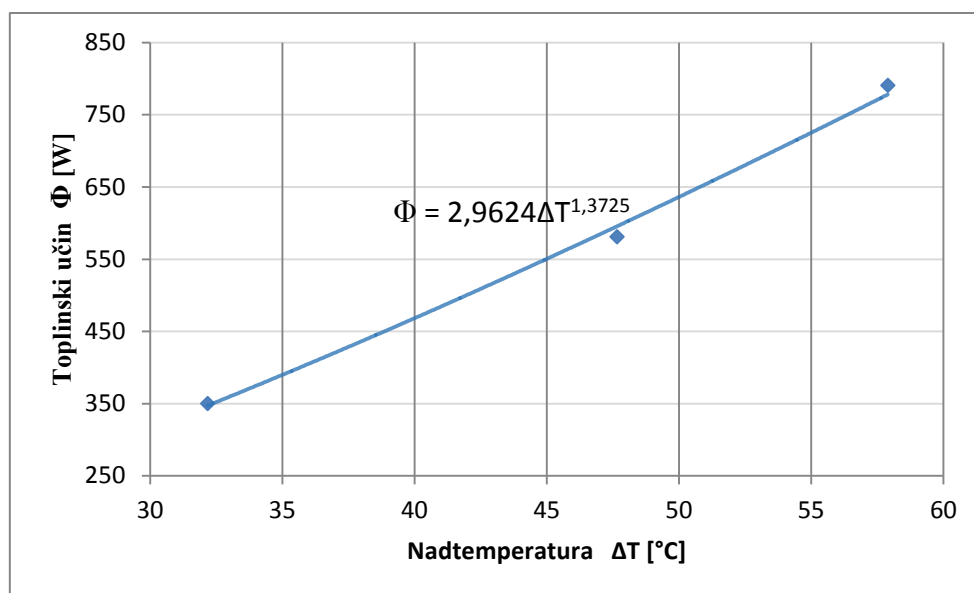
$$K_m = 2,9624$$

$$n = \frac{N \cdot \sum (\log \Delta T \cdot \log \Phi) - \sum (\log \Delta T) \cdot \sum (\log \Phi)}{N \cdot \sum [(\log \Delta T)^2] - (\sum (\log \Delta T))^2}$$

$$n = 1,3725$$

Iz toga slijedi karakteristična jednadžba toplinskog učina:

$$\Phi = 2,9624 \cdot \Delta T^{1,3725}$$

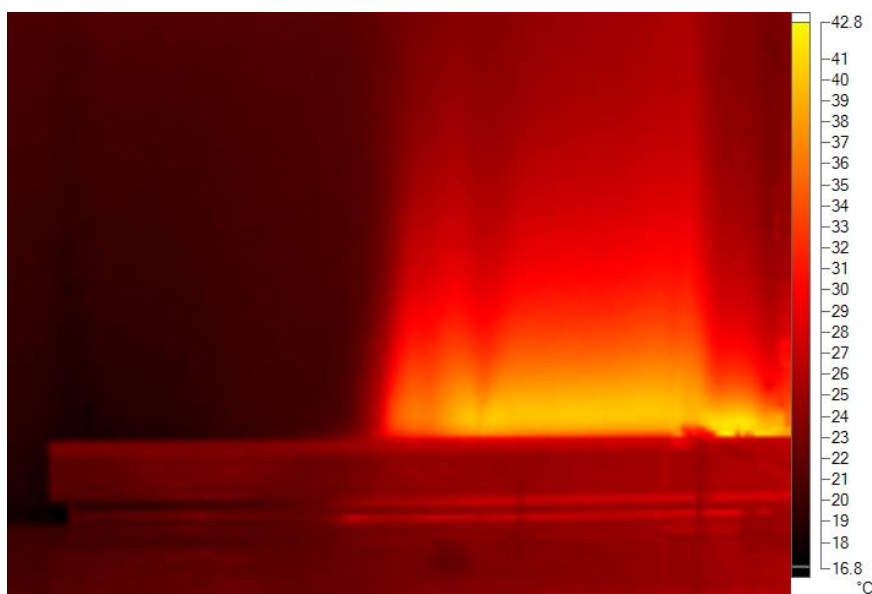


Slika 16. Karakteristična jednadžba toplinskog učina

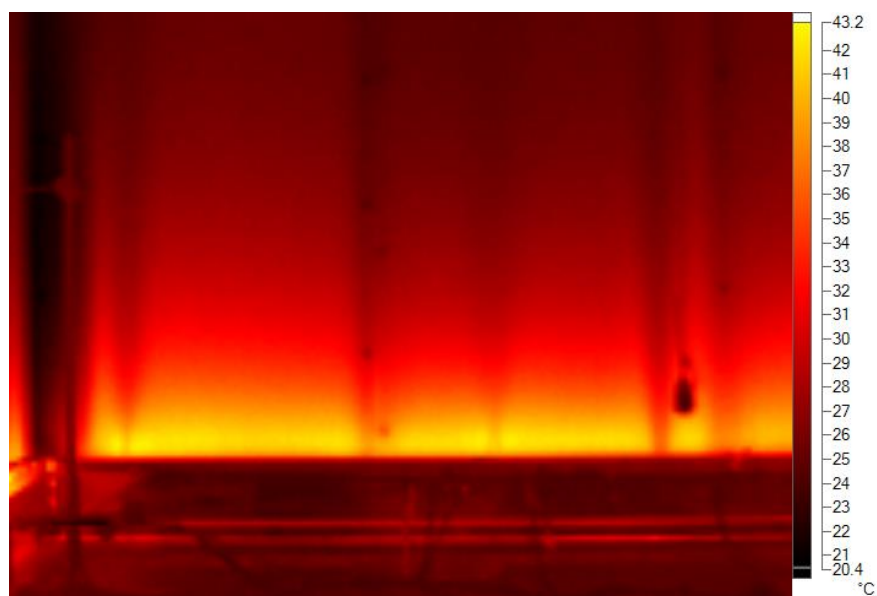
3.4. Termografija

Termografijom je nemoguće snimiti temperaturu zraka. Stoga termografsku kameru koristimo kako bi dobili temperaturnu raspodjelu po visini zida iznad podnog konvektora u prostoriji. Također domet mlaza toplog zraka je i indikator na kojim mjernim pozicijama postaviti termoparove i anemometre za dobivanje relevantnih mjernih podataka.

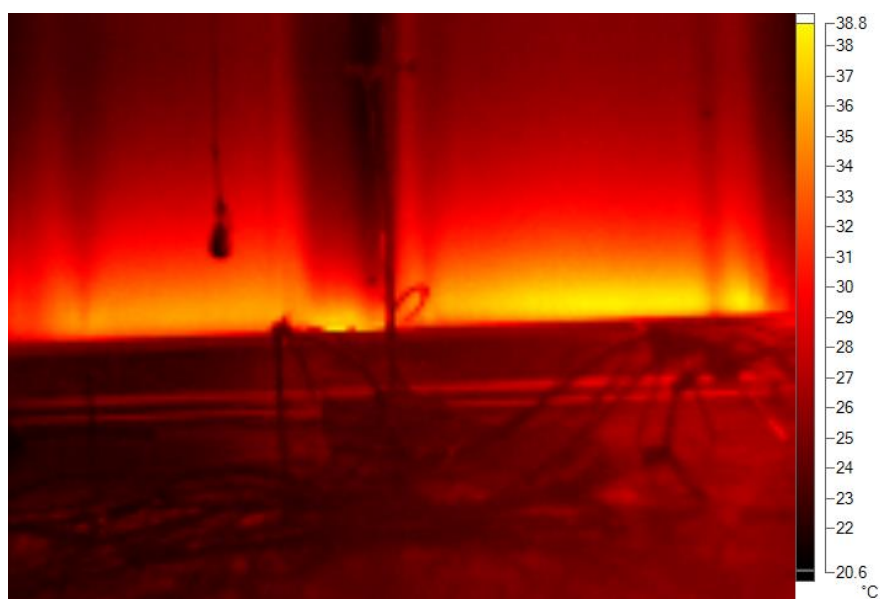
Slijedeće slike prikazuju termografske raspodjele temperatura duž duljine konvektora. Slike su dodatno obrađene u jednostavnom softveru „SmartView“.



Slika 17. Termogram bočnog zida iznad konvektora



Slika 18. Termogram zida iznad konvektora



Slika 19. Termogram zida iznad konvektora

4. PRORAČUN TOPLINSKOG UČINA OREBRENE POVRŠINE

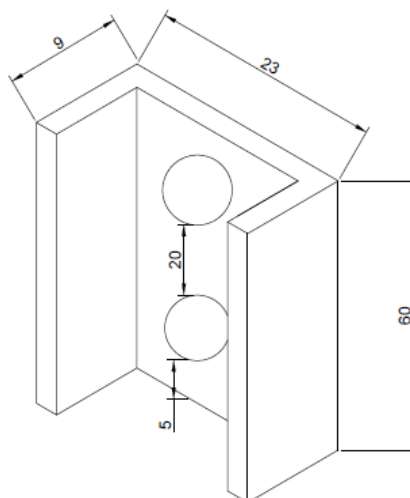
Odabrana metoda proračuna orebrene površine je ona iz VDI Heat Atlasa [2]. Proračun je proveden za režim iz točke 3.1.1. za $\Delta\vartheta = 47,66\text{ }^{\circ}\text{C}$

Ulazni podaci za proračun:

- maksimalna brzina strujanja zraka $w_z = 0,176\text{ m/s}$
- maseni protok vode $q_{m,w} = 0,0131\text{ kg/s}$

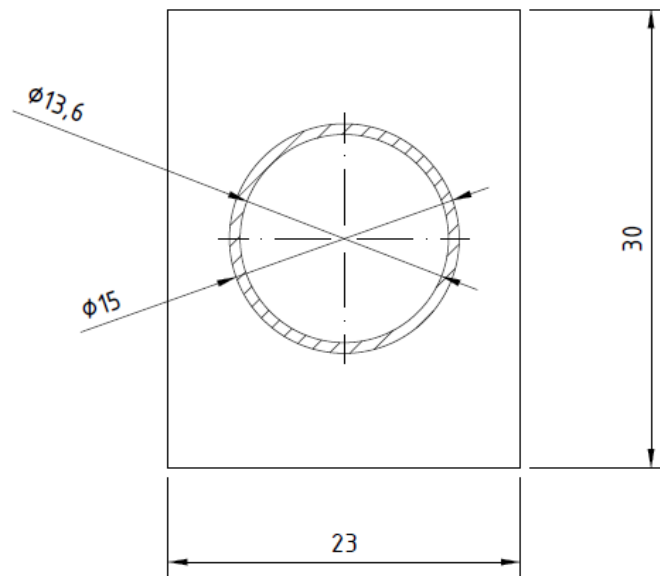
4.1. Konstrukcijske mjere:

- cijevi: bakrene $\Phi 15 \times 0,7$
 - vanjski promjer cijevi $d_o = 15\text{ mm}$
 - debljina stijenke cijevi $\delta_t = 0,7\text{ mm}$
 - unutarnji promjer cijevi $d_i = 13,6\text{ mm}$
 - toplinska vodljivost $\lambda_t = 400\text{ W/mK}$
- lamele – aluminijske
 - debljina $\delta = 0,2\text{ mm}$
 - razmak između dvije lamele $a = 10\text{ mm}$
 - korak $s = 10,2\text{ mm}$
 - širina $l_f = 23\text{ mm}$
 - visina $b_f = 30\text{ mm}$
 - treća dimenzija $c_f = 9\text{ mm}$
 - toplinska vodljivost $\lambda_f = 209\text{ W/mK}$



Slika 20. Skica lamele

Površina jedne lamele može se rastaviti na dva dijela kako bi model proračuna prema VDI-u bio zadovoljen.



Slika 21. Lamela podijeljena na dva dijela

4.2. Prijelaz topline na strani vode

Brzinu strujanja vode dobijemo iz jednadžbe kontinuiteta prema izrazu:

$$w_w = \frac{4 \cdot q_{m,w}}{\rho_w \cdot d_i^2 \cdot \pi}$$

Toplinske karakteristike za srednju temperaturu vode prema [4]:

$$\rho_w = 978 \text{ kg/m}^3$$

$$c_w = 4191 \text{ J/kgK}$$

$$\mu_w = 0,000404 \text{ Pas}$$

$$\lambda_w = 0,6587 \text{ kg/m}^3$$

Brzina strujanja je dakle:

$$w_w = \frac{4 \cdot 0,0131}{978 \cdot 0,0136^2 \cdot \pi} = 0,09197 \text{ m/s}$$

Reynoldsov broj:

$$Re = \frac{\rho_w \cdot w_w \cdot d_i}{\mu_w} = 3027,9$$

$2300 \leq Re \leq 10^4 \rightarrow$ prijelazno područje između laminarnog strujanja i turbulencije

Prandtllov broj:

$$Pr = \frac{\mu_w \cdot c_w}{\lambda_w} = 2,57$$

Za prijelazno područje između laminarnog strujanja i turbulencije koristi se slijedeći izraz:

$$Nu = (1 - \gamma) \cdot Nu_{lam,2300} + \gamma \cdot Nu_{turb,10^4}$$

Faktor γ iznosi:

$$\gamma = \frac{Re - 2300}{10^4 - 2300} = 0,0945$$

Nusseltov broj za $Re = 2300$ računa se prema izrazu:

$$Nu_{m,q,2300} = \left\{ 83,326 + (Nu_{m,q,2,2300} - 0,6)^3 + Nu_{m,q,3,2300}^3 \right\}^{1/3}$$

gdje su

$$Nu_{m,q,2,2300} = 1,953 \cdot \left(2300 \cdot Pr \cdot \frac{d_i}{l} \right)^{1/3} = 3,950$$

te

$$Nu_{m,q,3,2300} = 0,924 \cdot (Pr)^{1/3} \left(2300 \cdot \frac{d_i}{l} \right)^{1/2} = 2,271$$

Nusseltov broj za $Re = 2300$ prema tome iznosi:

$$Nu_{m,q,2300} = \{ 83,326 + (3,950 - 0,6)^3 + 2,271^3 \}^{1/3} = 4,976$$

Nusseltov broj za $Re = 10^4$ računa se prema izrazu:

$$Nu_{m,10^4} = \frac{\left(\frac{0,0308}{8} \right) \cdot 10^4 \cdot Pr}{1 + 12,7 \sqrt{\frac{0,0308}{8}} \left(Pr^{\frac{2}{3}} - 1 \right)} \left[1 + \left(\frac{d_i}{l} \right)^{\frac{2}{3}} \right] = 59,27$$

Nusseltov broj za prijelazno područje dakle iznosi:

$$Nu = (1 - 0,0945) \cdot 4,976 + 0,0945 \cdot 59,27 = 10,11$$

Iz Nusseltovog broja dobivamo koeficijent prijelaza topline na strani vode:

$$\alpha_i = \frac{Nu \cdot \lambda_w}{d_i} = \frac{10,11 \cdot 0,6587}{0,0136} = 489,6 \text{ W/m}^2\text{K}$$

4.3. Prijelaz topline na strani zraka

Toplinske karakteristike za srednju temperaturu zraka prema [4]:

$$\rho_z = 1,166 \text{ kg/m}^3$$

$$c_{p,z} = 1005 \text{ J/kgK}$$

$$\mu_z = 0,0000187 \text{ Pas}$$

$$\lambda_z = 0,0264 \text{ W/mK}$$

Reynoldsov broj iznosi:

$$Re = \frac{\rho_z \cdot w_z \cdot d_o}{\mu_z} = 164,3$$

Prandtllov broj:

$$Pr = \frac{\mu_z \cdot c_{p,z}}{\lambda_z} = 0,712$$

Karakteristične površine

- Unutarnja površina cijevi

$$A_i = d_i \cdot \pi \cdot l = 0,4153 \text{ m}^2$$

- Površina lamela

$$A_f = \frac{l}{s} \cdot 2 \cdot \left(l_f \cdot b_f + 2 \cdot b_f \cdot c_f - \frac{d_o^2 \cdot \pi}{4} \right) = 2,0055 \text{ m}^2$$

- Vanjska površina cijevi između rebara

$$A_t = d_o \cdot \pi \cdot l \cdot \frac{s}{a} = 0,4496 \text{ m}^2$$

- Vanjska površina neorebrene cijevi

$$A_{t0} = d_o \cdot \pi \cdot l = 0,4580 \text{ m}^2$$

- Ukupna površina izmjene topline

$$A = A_f + A_t = 2,4550 \text{ m}^2$$

Nusseltov broj za prijelaz topline u orebrenim cijevima računa se prema izrazu:

$$Nu = C \cdot Re^{0,6} \cdot \left(\frac{A}{A_{t0}} \right)^{-0,15} \cdot Pr^{\frac{1}{3}}$$

Konstanta C za paralelni raspored cijevi iznosi $C = 0,20$.

Omjer površina iznosi:

$$\frac{A}{A_{t0}} = 5,356$$

Nusseltov broj dakle iznosi:

$$Nu = 0,20 \cdot 164,29^{0,6} \cdot 5,356^{-0,15} \cdot 0,712^{\frac{1}{3}} = 2,964$$

Iz Nusseltovog broja proizlazi koeficijent prijelaza topline na strani zraka:

$$\alpha_m = \frac{Nu \cdot \lambda_z}{d_o} = 5,216 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Nadalje, računamo koeficijent prijelaza topline na orebrenoj cijevi prema izrazu:

$$\alpha_v = \alpha_m \left[1 - (1 - \eta_f) \cdot \frac{A_f}{A} \right]$$

Za izračun korisnosti lamele potrebno je izračunati pomoćne faktore φ' , φ i X prema izrazima:

$$\varphi' = 1,28 \cdot \frac{b_f}{d_o} \sqrt{\left(\frac{l_f}{b_f} - 0,2 \right)} = 1,9271$$

$$\varphi = (\varphi' - 1) \cdot (1 + 0,35 \cdot \ln \varphi') = 1,1400$$

$$X = \varphi \cdot \frac{d_o}{2} \sqrt{\frac{2 \cdot \alpha_m}{\lambda_f \cdot \delta}} = 0,1351$$

Iskoristivost lamele računa se prema izrazu:

$$\eta_f = \frac{\tanh X}{X} = 0,994$$

Koeficijent prijelaza topline na orebrenoj cijevi dakle iznosi:

$$\alpha_v = 5,216 \left[1 - (1 - 0,994) \cdot \frac{2,0055}{2,4550} \right] = 5,191 \text{ W/m}^2\text{K}$$

4.4. Koeficijent prolaza topline

Koeficijent prolaza topline računa se iz izraza:

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{\alpha_v} + \frac{A}{A_i} \left(\frac{1}{\alpha_i} + \frac{d_o - d_i}{2 \cdot \lambda_t} \right) = 0,2047 \frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}}$$

Iz prethodnog slijedi koeficijent prolaza topline

$$k = 4,884 \text{ W/m}^2\text{K}$$

4.5. Toplinski učin

Toplinski učin određuje se prema slijedećem izrazu:

$$\Phi = k \cdot A \cdot \Delta\vartheta_m$$

Srednja logaritamska razlika temperatura iznosi:

$$\Delta\vartheta_m = \frac{\vartheta_{w,1} - \vartheta_{w,2}}{\ln \left(\frac{\vartheta_{w,1} - \vartheta_r}{\vartheta_{w,2} - \vartheta_r} \right)} = 45,45 \text{ }^\circ\text{C}$$

Toplinski učin dakle iznosi:

$$\Phi = 4,884 \cdot 2,455 \cdot 45,45 = 545,0 \text{ W}$$

4.6. Usporedba eksperimentalnih i numeričkih rezultata

Proračun za druga dva režima proveden je analogno prethodno prikazanom proračunu prema [3].

Dobiveni su slijedeći rezultati:

	$\Delta\vartheta$ [°C]	α_i [W/m ² K]	α_v [W/m ² K]	k [W/m ² K]	Φ [W]
3.1.3.	32,17	204,8	4,898	4,291	337,56
3.1.1.	47,66	489,6	5,191	4,884	545,00
3.1.2.	57,90	545,8	5,421	5,120	723,36

Tablica 6. Rezultati prema proračunu orebrenja

	Oznaka	Jedinica	1)	2)	3)
Nadtemperatura	$\Delta\vartheta$	°C	32,17	47,66	57,90
Učin (ekperimentalno-voda)	Φ	W	350,08	581,22	790,78
Učin (numerički-VDI)	Φ	W	337,56	545,00	723,36

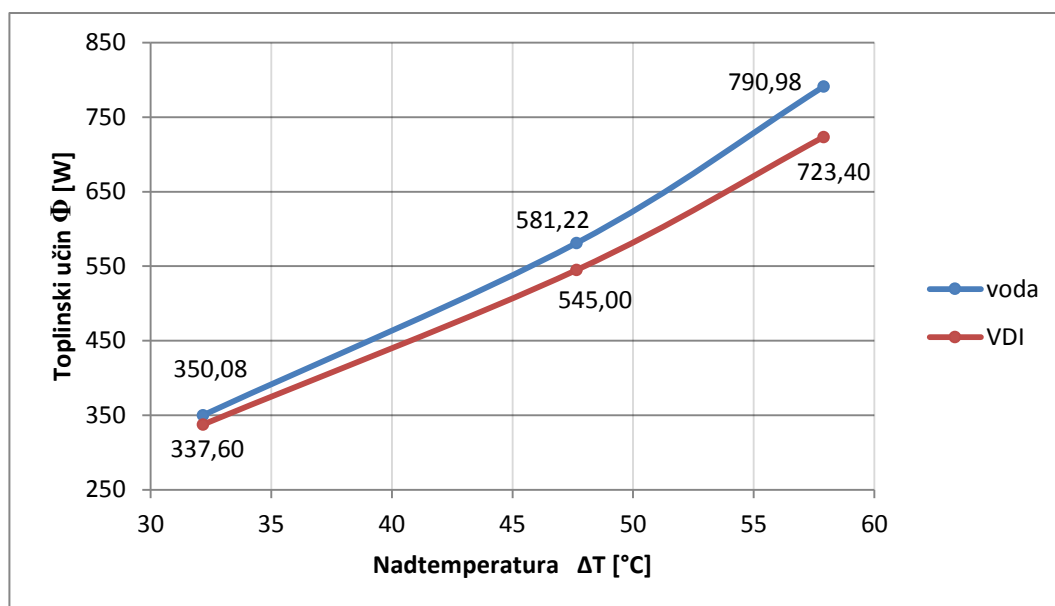
Tablica 7. Usporedba eksperimentalnih i numeričkih rezultata

Usporedbom rezultata za tri mjerne točke uvidamo da eksperimentalan pristup daje u pravilu veći toplinski učin nego numerički proračun. Također primjećujemo kako su razlike u dobivenim rezultatima prilično male, te omjer dobivenih vrijednosti raste s porastom nadtemperature. Omjeri su izračunati i prikazani tablično:

Nadtemperatura $\Delta\vartheta$ [°C]	Omjer učina
32,17	1,037
47,66	1,066
57,90	1,093

Tablica 8. Omjeri rezultata dobivenih eksperimentalno i numerički

Također dobivamo prilično niske vrijednosti koeficijenta prolaza topline k što možemo pripisati niskom koeficijentu prijelaza topline na orebrenoj cijevi α_v koji je posljedica vrlo male brzine strujanja zraka (slobodna konvekcija).



Slika 22. Usporedba eksperimentalnih i numeričkih rezultata

5. PARAMETARSKA ANALIZA

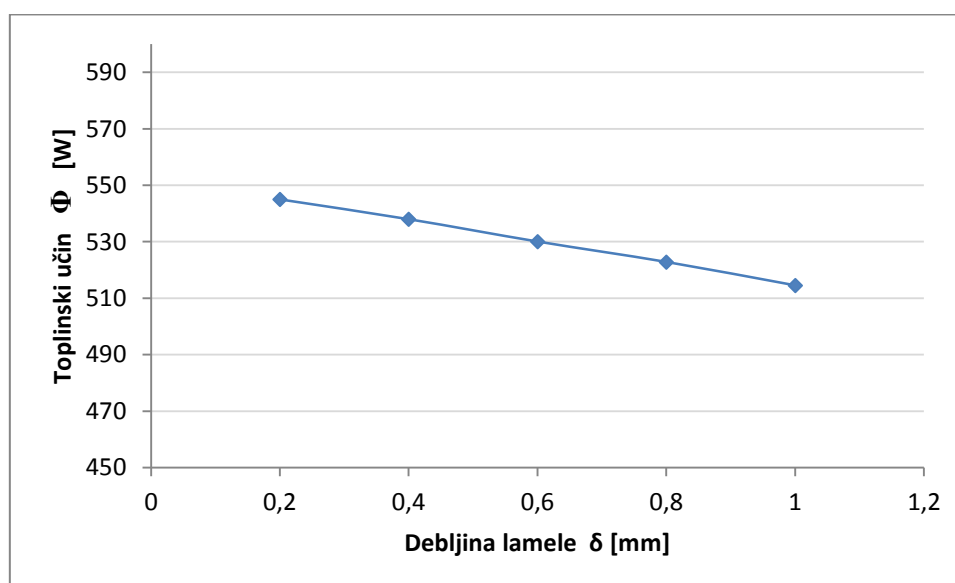
U ovom poglavlju provedena je parametarska analiza s ciljem poboljšanja toplinskog učina konvektora. Analiza je provedena ispitivanjem utjecaja promjene određenih parametara na toplinski učin uz nepromjenjivost svih ostalih parametara bitnih za proračun. Ispitivani su slijedeći parametri:

- debljina te razmak između lamela
- visina i širina lamele
- materijal lamele
- protok vode

5.1. Debljina i razmak između lamela

Debljina lamele δ [mm]	Toplinski učin Φ [W]
0,2	545,00
0,4	537,98
0,6	530,08
0,8	522,85
1,0	514,57

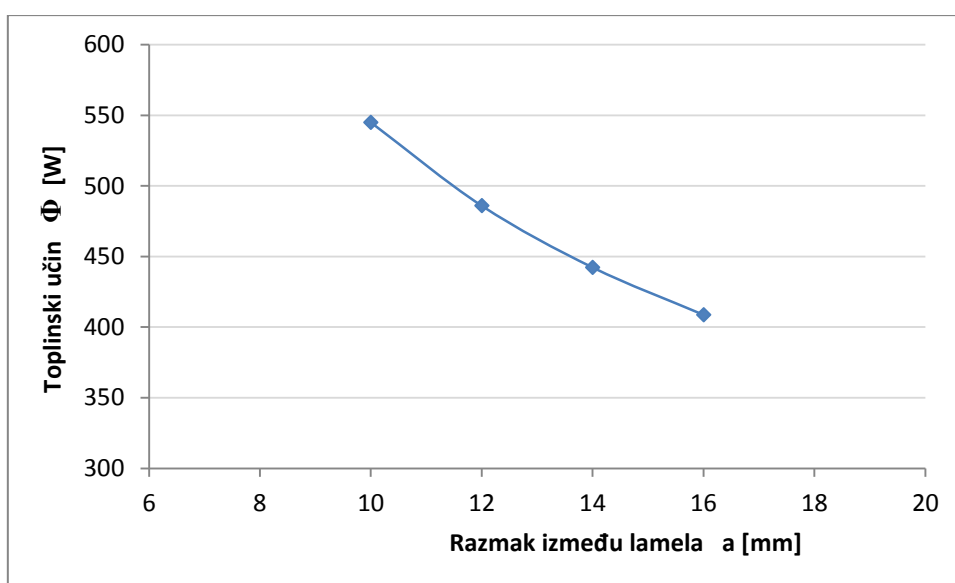
Tablica 9. Utjecaj debljine lamela na toplinski učin



Slika 23. Utjecaj debljine lamela na toplinski učin

Razmak između lamela a [mm]	Toplinski učin Φ [W]
10	545,00
12	485,97
14	427,27
16	408,74

Tablica 10. Utjecaj razmaka između lamela na toplinski učin



Slika 24. Utjecaj razmaka između lamela na toplinski učin

Iz dijagrama i tablica zaključujemo da toplinski učin pada i sa porastom debljine lamela i sa porastom razmaka između lamela.

Porastom debljine lamela toplinski učin pada blago i približno linearno. Sa stajališta povećanja toplinskog učina težimo čim manjoj vrijednosti debljine lamele što je za ispitivani konvektor ispunjeno u potpunosti pošto je ona samo 0,2 mm. Toplinski učin smanjuje se povećavanjem debljine lamele jer u parametarskoj analizi sve ostale vrijednosti ostaju nepromijenjene pa tako i duljina konvektora te razmak između lamela. Za veću debljinu lamele te nepromijenjenu duljinu konvektora i nepromijenjeni razmak između lamela dobivamo manji ukupni broj lamela, te time i manju orebrenu površinu, što daje takav, na prvi pogled neočekivani rezultat parametarske analize.

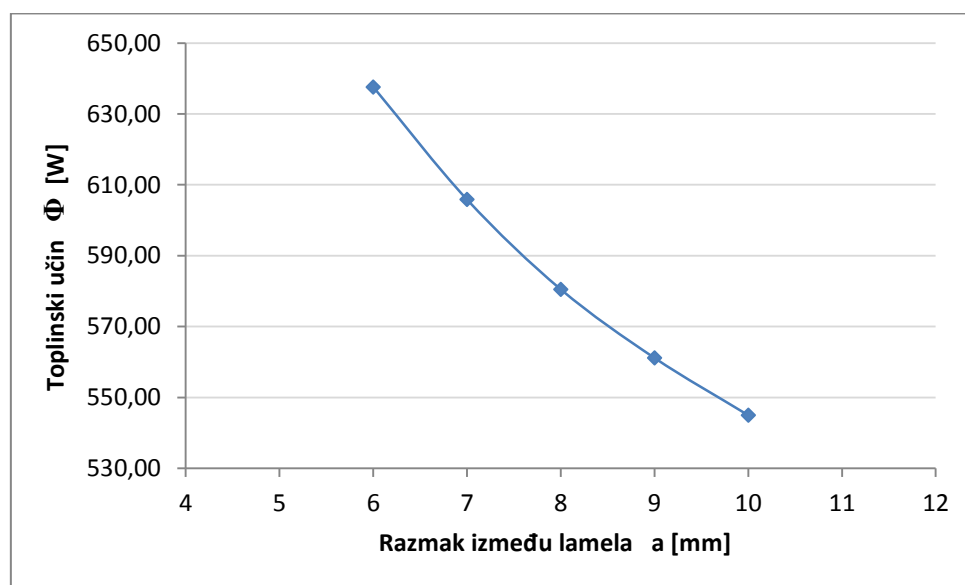
Iako porastom razmaka između lamela toplinski učin također pada, u odnosu na pad uvjetovan porastom debljine lamela, pad je mnogo strmiji te nije linearan. Karakteristika je najbrže padajuća pri manjim vrijednostima razmaka između lamela. Pad je i očekivan pošto porastom razmaka lamela na nepromijenjenoj ukupnoj duljini konvektora smanjujemo broj

lamela a time i ukupnu površinu izmjene topline. Za slučaj ispitivanog konvektora, razmak ne možemo dodatno smanjiti zbog posebne konstrukcijske izvedbe lamele prikazane na [Slika 17]. Sa stajališta povećanja toplinskog učina također težimo čim manjoj vrijednosti razmaka između lamela.

Za potrebe parametarske analize još ćemo ispitati kako se mijenja karakteristika toplinskog učina kod zgušćivanja lamela. Kako je već navedeno, zbog posebne konstrukcijske izvedbe lamela, uz smanjenje razmaka između lamela, paralelno ćemo smanjivati i dimenziju lamele c .

Razmak između lamela a [mm]	Dimenzija lamele c [mm]	Toplinski učin Φ [W]
10	9	545,00
9	8	561,16
8	7	580,51
7	6	605,85
6	5	637,61

Tablica 11. Utjecaj smanjena razmaka između lamela te dimenzije c na toplinski učin



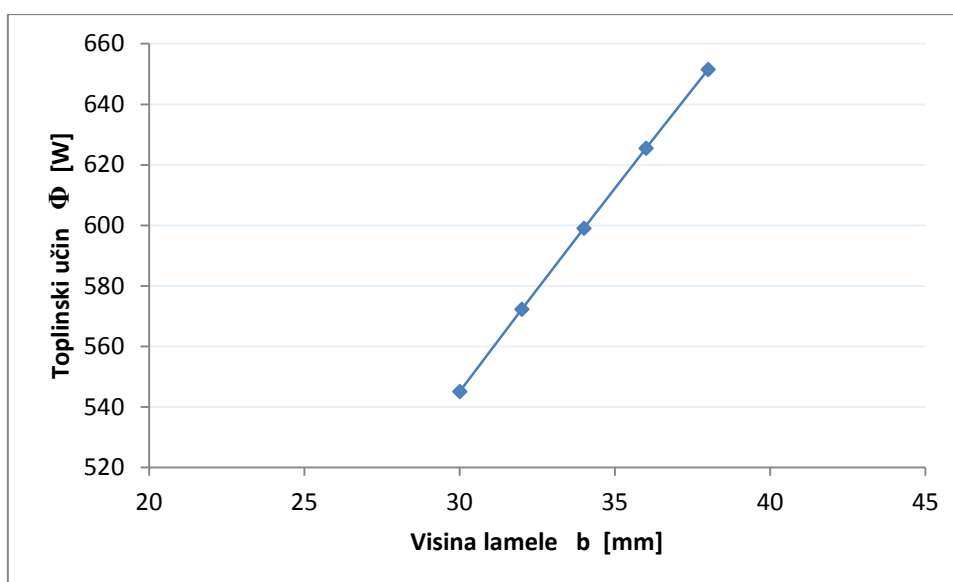
Slika 25. Utjecaj smanjena razmaka između lamela te dimenzije c na toplinski učin

Tablično i dijagramski je prikazana očekivana karakteristika porasta toplinskog učina zgušćivanjem lamela.

5.2. Visina i širina lamele

Visina lamele b_f [mm]	Toplinski učin Φ [W]
30	545,00
32	572,23
34	599,03
36	625,43
38	651,45

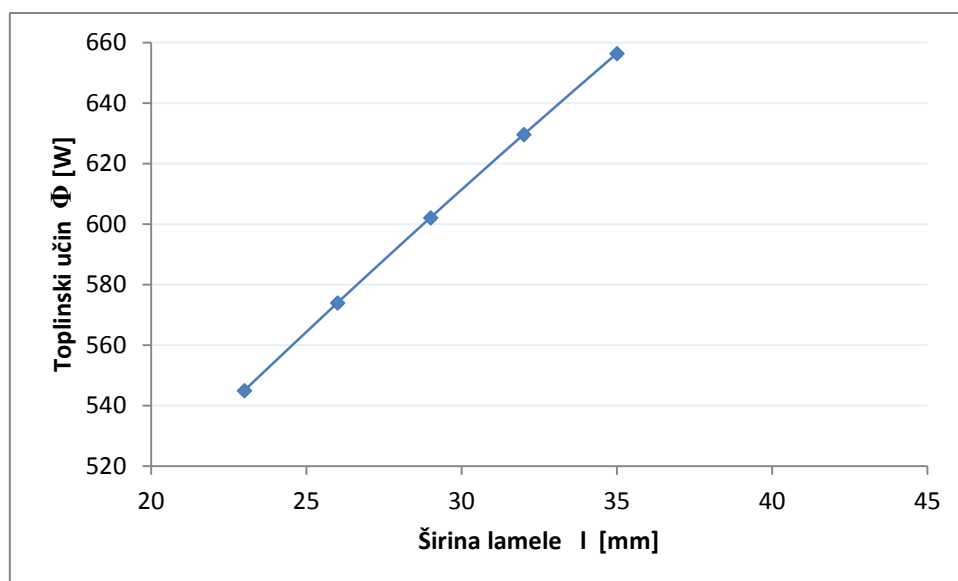
Tablica 12. Utjecaj visine lamele na toplinski učin



Slika 26. Utjecaj visine lamele na toplinski učin

Širina lamele l_f [mm]	Toplinski učin Φ [W]
23	545,00
26	573,96
29	602,16
32	629,63
35	656,40

Tablica 13. Utjecaj širine lamele na toplinski učin



Slika 27. Utjecaj širine lamele na toplinski učin

Iz dijagrama i tablica zaključujemo da toplinski učin raste sa porastom dimenzija lamele. Rast je očekivan i logičan pošto se povećanjem dimenzija lamele povećava i ukupna površina izmjene topline. Porastom dimenzija lamele toplinski učin raste približno linearno.

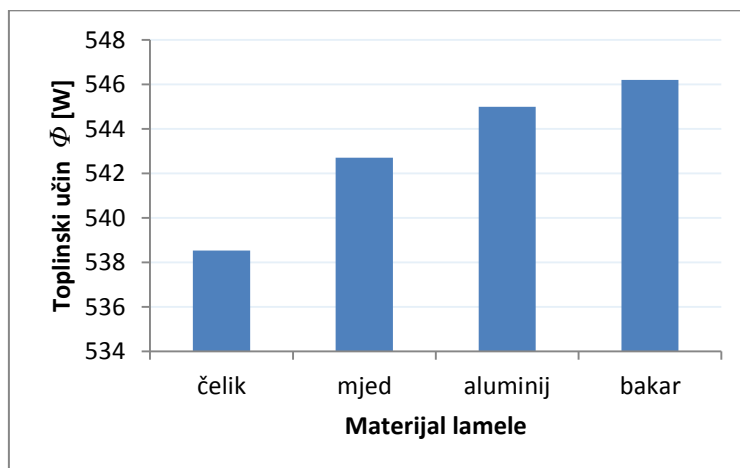
Vrlo zanimljiv zaključak dobivamo uspoređujući dva dijagrama. Iz dijagrama se dobro vidi da je karakteristika utjecaja porasta visine lamele na porast toplinskog učina strmija od karakteristike utjecaja porasta širine lamele na porast toplinskog učina. Iz toga zaključujemo da ukoliko proizvođač želi povećati površinu lamela, sa stajališta povećanja toplinskog učina, isplativije je povećavati visinu naspram širine lamele.

5.3. Materijal lamele

Toplinska vodljivost pojedinog materijala očitana je prema [4].

Materijal lamele	Toplinska vodljivost λ [W/mK]	Toplinski učin Φ [W]
Čelik	58	538,54
Mjed	109	542,70
Aluminij	209	545,00
Bakar	400	546,21

Tablica 14. Utjecaj materijala lamele na toplinski učin



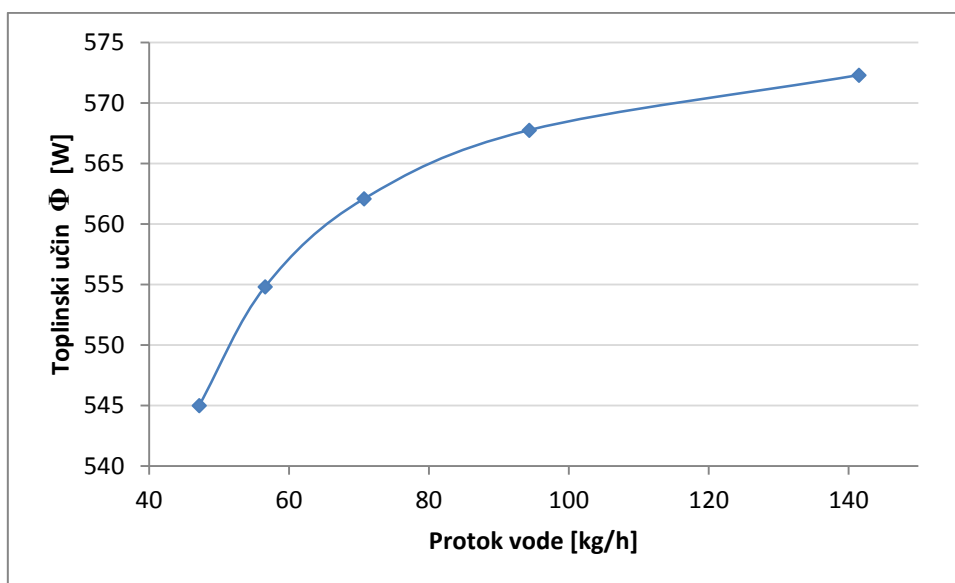
Slika 28. Utjecaj materijala lamele na toplinski učin

Iz dijagrama i tablice vidljivo je da izbor materijala nema veliki utjecaj na toplinski učin. Također primjećujemo da učin raste porastom koeficijenta toplinske vodljivosti materijala. Biramo materijale sa dobrim toplinskim svojstvima.

5.4. Protok vode

Postotak porasta protoka [%]	Protok vode $q_{m,w}$ [kg/h]	Toplinski učin Φ [W]
0	47,16	545,00
20	56,59	554,82
50	70,74	562,09
100	94,32	567,76
200	141,48	572,31

Tablica 15. Utjecaj protoka vode na toplinski učin



Slika 29. Utjecaj protoka vode na toplinski učin

Iz tablice i dijagrama je vidljivo da toplinski učin raste s porastom protoka vode, no u postocima vrlo slabo naspram postocima porasta samog protoka. Karakteristika je sve položitija na sve većim vrijednostima protoka vode.

Također valja primijetiti da takvim povećanjem protoka uvjetujemo porast pada tlaka u sustavu čime se povećava potrebna snaga cirkulacijske pumpe a time i potrošnja električne energije. Zaključujemo da povećanje protoka vode s ciljem povećanja toplinskog učina nije nikako isplativo.

5.5. Zaključak parametarske analize

Provedenom parametarskom analizom, došli smo do zaključka da toplinski učin možemo najbolje povećati na dva načina:

- zgušćivanjem lamela – smanjenjem razmaka između lamela
- povećanjem površine lamele – povećavanjem širine i visine lamele

Kako bismo pravilno usporedili ta dva načina te time utvrdili koji od njih je isplativiji, prikazat ćemo tablično i dijagramski karakteristike toplinskog učina po kvadratnom metru orebrene površine po metru duljine konvektora.

Razmak između lamela a [mm]	Toplinski učin Φ [W]	Orebrena površina A_f [m ²]	Toplinski učin $\Phi/A/L_k$ [W/m ² /m]
10	545,00	2,0055	55,92
9	561,16	2,0978	55,04
8	580,51	2,2100	54,05
7	605,85	2,3579	52,87
6	637,61	2,5472	51,51

Tablica 16. Vrijednosti karakterističnih veličina uz smanjenje razmaka između lamela

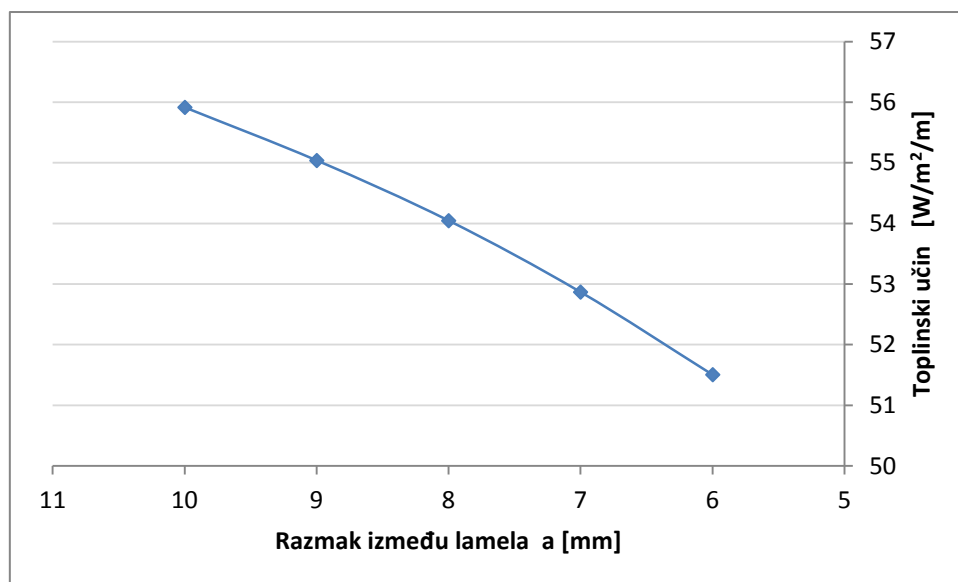
Visina lamele b_f [mm]	Toplinski učin Φ [W]	Orebrena površina A_f [m ²]	Toplinski učin $\Phi/A/L_k$ [W/m ² /m]
30	545,00	2,0055	55,92
32	572,23	2,1616	54,47
34	599,03	2,3177	53,18
36	625,43	2,4738	52,02
38	651,45	2,6300	50,97

Tablica 17. Vrijednosti karakterističnih veličina uz povećanje visine lamele

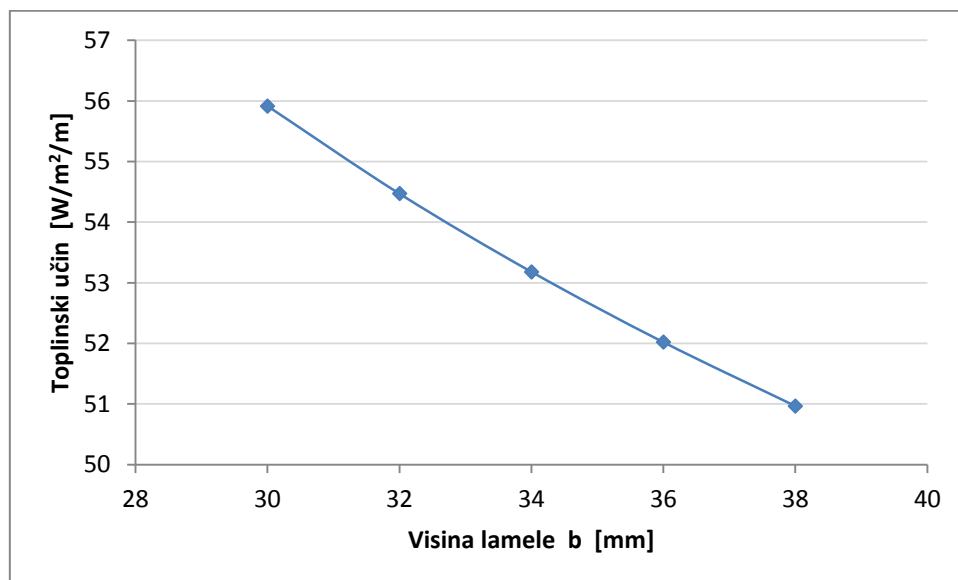
Širina lamele l_f [mm]	Toplinski učin Φ [W]	Orebrena površina A_f [m ²]	Toplinski učin $\Phi/A/L_k$ [W/m ² /m]
30	545,00	2,0055	55,92
32	573,96	2,1768	54,25
34	602,16	2,3482	52,76
36	629,63	2,5195	51,42
38	656,40	2,6909	50,19

Tablica 18. Vrijednosti karakterističnih veličina uz povećanje širine lamele

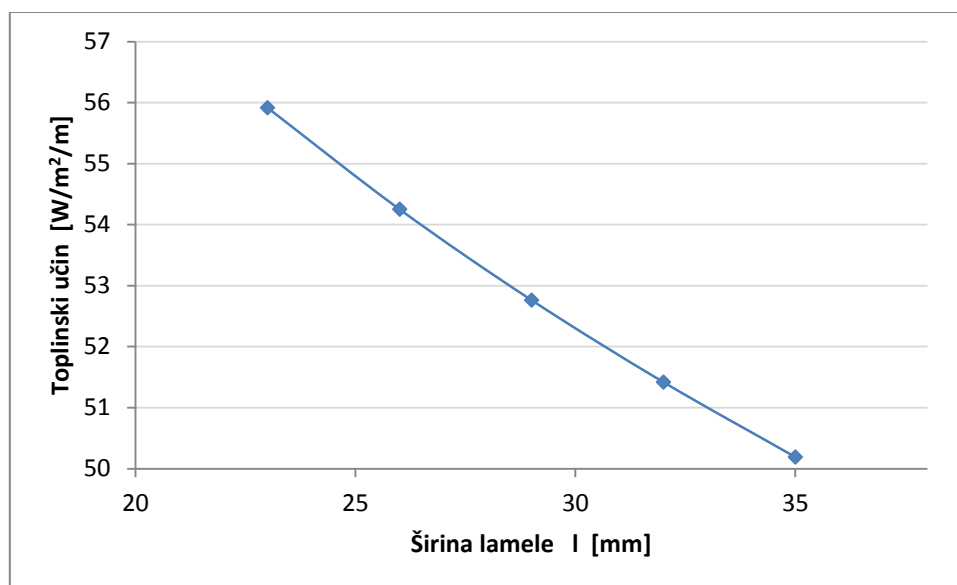
Iz tabličnih podataka je vidljivo je postotni porast toplinskog učina s promjenom parametara manji od porasta orebrene površine. Zato karakteristika toplinskog učina svedena na orebrenu površinu i duljinu konvektora pada. U dijagramskom prikazu uspoređujemo nagibe krivulja.



Slika 30. Utjecaj razmaka između lamela na toplinski učin $\Phi/A/L_k$



Slika 31. Utjecaj visine lamele na toplinski učin $\Phi/A/L_k$



Slika 32. Utjecaj širine lamele na toplinski učin $\Phi/A/L_k$

Iz dijagramskog prikaza uviđamo da su nagibi prilično bliski. Detaljnijom analizom dolazimo do zaključka da najblaži pad ima karakteristika utjecaja razmaka između lamela, a najstrmija je karakteristika utjecaja širine lamele. Zaključujemo da je najisplativije toplinski učin povećavati zgušćivanjem lamela, međutim povećanjem površine dobivamo također vrlo dobre rezultate.

Ovdje također treba napomenuti da ne smijemo previše povećavati površinu lamela za zadanu cijev pošto time negativno utječemo na iskoristivost lamele. Također treba biti i oprezan sa smanjivanjem razmaka lamela pošto u nekim primjenama može doći do zaprljanja lamela te time otežanog čišćenja istih.

6. ZAKLJUČAK

U ovom radu prikazani su i obrađeni rezultati mjerenja na podnom konvektoru iz Laboratorija za toplinu i toplinske uređaje u tri mjerne točke prema normi HRN EN 442-2.

Rezultati mjerenja toplinskog učina na strani vode bili su ogledna veličina za procjenu kvalitete mjerenja. Usporedbom istih sa rezultatima mjerenja toplinskog učina na strani zraka zaključeno je da su odstupanja relativno niska - razlike dobivenih vrijednosti toplinskih učina za svaku od tri mjerne točke manje su od 10% . Mjerenje je bilo teško izvršiti sa velikom preciznošću pošto su brzine strujanja zraka zbog slobodne konvekcije vrlo male

Rezultati mjerenja su korišteni kao ulazni podaci za proračun i parametarsku analizu. Proračun je proveden prema metodi iz VDI Heat Atlasa za orebrene površine. Pokazao je je da su eksperimentalne vrijednosti toplinskog učina nešto veće od vrijednosti dobivenih numeričkim putem.

Na kraju je parametarskom analizom pokazano da povećanje toplinskog učina na zadanom konvektoru (za konst. duljinu konvektora, vanjski i unutarnji promjer te materijal cijevi) postićemo smanjenjem debljine lamele te razmaka između lamela, povećanjem širine i visine lamele te izborom materijala lamele sa čim boljim svojstvom toplinske vodljivosti. Najisplativije rješenje treba tražiti preko kombinacije zgušćivanja lamela te povećanja površine lamela.

LITERATURA

- [1] - Prof. dr. sc. Balen I. – podloge za predavanja iz kolegija „Grijanje“
- [2] - EN 442-2: Radiators and convectors – Part 2: Test methods and rating, 2014
- [3] - Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2010: VDI Heat Atlas
- [4] - Halasz B., Galović A., Boras I. : Toplinske tablice, FSB, Zagreb, 2010